DOI：10.13245/j.hust.240744

基于数字孪生的复杂件多机器人智能加工方法

段现银[1,2] 邵宇轩[1] 彭芳瑜[3] 向 峰[1] 杨岑岑[2] 周 林[2]

(1．武汉科技大学冶金装备及其控制省部共建教育部重点实验室，湖北 武汉 430081；
2．国家数字化设计与制造创新中心，湖北 武汉 430074；
3．华中科技大学智能制造装备与技术全国重点实验室，湖北 武汉 430074)

摘要 针对舱体类构件内部存在众多复杂相交特征且可行空间狭小，其内壁等加工有极大困难，制造设备的加工效率和智能化水平难以满足航天装备快速和高质量发展需求问题，为提高舱体类构件制造设备的加工效率和智能化水平，提出了一种基于数字孪生的多机器人智能协同加工方法．构建了不同功能机器人协同加工系统虚拟空间、物理空间和信息数据层的数字孪生框架，详细阐述了孪生数据源及类型、数据融合和数据存储等孪生数据模型的设计；建立了多机器人协同加工优化控制与决策模型，研制了多机器人智能加工软硬件平台，实现了虚实映射与交互以及加工系统在线监控．以某型号飞行器舱段精密铣削和测量工艺为案例进行验证与分析，优化加工路线，提高加工效率，验证了该方法的可行性与高效性．

关键词 智能制造；智能加工；数字孪生；多机器人；舱体类构件

中图分类号 V461 **文献标志码** A **文章编号** 1671-4512(2024)06-0001-09

Digital twins based multi-robot intelligent machining method for complex components

DUAN Xianyin[1,2] *SHAO Yuxuan*[1] *PENG Fangyu*[3] *XIANG Feng*[1] *YANG Cencen*[2] *ZHOU Lin*[2]

(1．Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology of Ministry of Education，Wuhan University of Science and Technology，Wuhan 430081，China；2．National Innovation Institute of Digital Design and Manufacturing，Wuhan 430074，China；3．State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology，Huazhong University of Science and Technology，Wuhan 430074，China)

Abstract As an important component of aerospace equipment such as missiles，rockets and satellites，there are many complex intersecting characteristics and narrow feasible space inside the cabin components，which bring great challenges to the processing of its inner wall，and thus the processing efficiency and intelligence level of manufacturing equipment are difficult to meet the rapid and high-quality development needs of aerospace equipment. To improve the machining efficiency and intelligent level of cabin component manufacturing equipment，a multi-robot intelligent collaborative machining method based on digital twin was proposed. The digital twin framework of virtual space，physical space and information data layer of robot collaborative processing system with different functions was constructed. The design of twin data model such as twin data source and type，data fusion and data storage was elaborated in detail，and the optimal control and decision-making model of multi-robot collaborative processing was established. The software and hardware platform of multi-robot intelligent processing was developed. The virtual-real mapping and interaction were realized，and the on-line monitoring of processing system was realized. Taking the precision milling and measurement process of a certain type of aircraft cabin as a case for verification and analysis，the processing route was optimized，the processing efficiency was improved，and the feasibility and efficiency of the method were verified.

收稿日期 2022-12-11．

作者简介 段现银(1986－)，男，副教授，E-mail：xyduan@wust.edu.cn．

基金项目 国家自然科学基金资助项目(51605346)；湖北省重点研发计划资助项目(2022BAA059)．

Key words intelligent manufacturing；intelligent processing；digital twins；multi-robot；cabin components

国家对导弹、运载火箭和卫星等航天飞行器的需求量逐年快速增加，迫切需要高效高品质的航天飞行器加工装备与技术支撑．复杂舱体类构件是该类航天飞行器的重要组件，以导弹为例，弹体结构包含的舱段种类多达数十种，对其飞行阻力和速度及弹身整体动力学性能都有重要影响．飞行器型号与种类更新迅速，要求工艺准备时间大幅缩短，对加工效率大幅提升提出了挑战；而且对飞行器质量要求克克计较，使得舱段等主要构件的加工精度必须显著提高，壁厚偏差显著降低．然而此类构件极其复杂，型腔内壁存在众多复杂相交特征，使其加工过程极其困难[1]．因此，构件种类繁多、加工特征形态各异、加工可行空间狭小和生产周期极短等是该类构件加工中的主要难点．

针对该类多品种复杂多特征难加工构件，通常是由多机床组成的生产线辅以人工操作来完成，这种工序分散的加工方式敏捷性差，难以响应飞行器型号快速更新，而且智能协同水平普遍较低．机器人加工具有高自由度、大可行空间、便于协同加工的优势，使得其成为舱体类难加工构件制造的可行方案．已有较多研究者对机器人在加工制造中的应用开展了研究．赵文政等[2]认为采用多机器人加工技术能够提高任务分配效率，是一种有效的解决方案．针对多机器人加工的研究也取得了一些成果，如适用于多机器人控制的框架设计及软件开发[3]，多机器人实时传感和信息传递方法及误差分析[4]，多机器人加工稳定性研究[5]等．上述研究涉及了多机器人加工过程控制、多机器人信息感知与传递和多机器人加工稳定性等内容，验证了多机器人加工的可行性和有效性，但在智能协同方法和优化决策与控制等方面还有待进一步深入．

随着智能制造技术的快速发展，信息物理系统(cyber-physical system，CPS)、数字孪生(digital twin，DT)等理论与技术应运而生，并迅速成为各国各领域智能制造技术发展方向和研究热点[6]．例如将信息物理系统应用于生产优化控制系统，实现不同工况条件下生产过程的自适应控制，提高控制品质[7]．基于信息物理系统的框架理论，针对数控机床加工提出了信息物理生产系统(CPPS)[8]．利用传感器采集制造过程中的数据[9]并结合智能算法[10]，可进行加工过程的状态监测．进一步将加工过程物理模型与加工过程多源大数据进行融合，形成刀具状态监测[11]的智能加工监控方法．也有研究针对多机器人协同调度作业中的任务分配，提出多机自律协同调度方法，解决多机器人路径冲突检测问题[12]．数字孪生作为智能制造技术的应用手段[13]，借用多源传感器获取实际加工过程中的实时数据，结合智能算法对采集数据进行特征分析、数据融合和数据传输，以实现数字孪生动态运行和虚实空间高效融合[14-17]．Zhou等[18]以知识驱动的数字孪生制造单元(KDTMC)的总体框架，通过智能感知、模拟、预测、优化和控制策略来支撑智能制造．Liu等[19]提出了基于知识进化加工特征的数字孪生过程模型(DTPM)构建方法，解决了过程知识的关联结构、演化几何特征的表达方法及两者之间的关联机制三个关键技术．隋少春等[20]结合数字孪生与人工智能(AI)的技术特点，探讨了两者融合的机理、涉及的关键技术和人工智能控制中心的构建问题．

以上研究将信息物理系统、数字孪生与工业制造体系相结合，提出了各种新的制造方法与策略，提高了生产制造的效率和质量，扩大了智能制造在各领域的影响．对于多品种、多特征且形状复杂的整体构件，其加工效率和智能化水平对于保证装备型号快速和高质量更新至关重要．而已有关于多机器人加工的研究多采用离线编程方式，难以解决加工过程面临的信息分散、环境复杂、协同困难和加工一致性难以控制等诸多实际挑战．为了更好地满足航天类构件高效高精加工要求，亟须研究多机器人智能协同加工方法，实现多机器人优化决策和协同控制，优化工艺路线和加工轨迹，大幅提升加工系统的加工效率和智能化水平．本研究针对舱体类构件高效高精加工需求，提出了一种基于数字孪生的多机器人智能协同加工方法，构建了多机器人智能协同加工系统数字孪生框架、加工过程孪生数据融合与处理模型及加工系统优化控制与决策模型，设计了多机器人智能协同加工工艺路线，搭建了多机器人智能协同加工平台．并以航天舱段为对象，在协同加工平台上进行了精密铣削和测量工艺案例验证与分析，证明了基于数字孪生的多机器人智能协同加工方法在舱段加工中的可行性和高效性．

1 多机器人智能协同加工系统架构

1.1 加工系统数字孪生框架

多机器人加工系统具有结构组成与运行机理复杂、过程数据多源异构、协同优化困难等特点．实

现多机器人加工系统的干涉回避、轨迹规划、异构数据融合、工艺优化和智能协同，保证加工系统运行的高效高质和安全可靠，对于多机器人加工系统极为重要．数字孪生技术基于集成所有设备的网络，通过形成物理空间中制造过程模型及其在虚拟空间中的数字化镜像，建立物理对象的虚拟映射，可实现制造过程物理空间与虚拟空间的深度融合，并监控物理对象在虚拟空间中的实时状态．通过智能化算法与软件平台，处理与分析多维多源异构数据，预测运行过程和潜在风险，合理高效规划设备运行与维护，实现对制造过程的精准控制．

本研究基于数字孪生五维模型[14]构建了多机器人智能协同加工系统数字孪生框架，该框架通过物理空间、虚拟空间和孪生数据的关联融合，实现多机器人协同加工过程的信息交互和虚实映射．在满足目标产品的性能要求下，通过协同控制和迭代优化达到加工系统自组织、自适应和最优化运行状态，如图1所示．

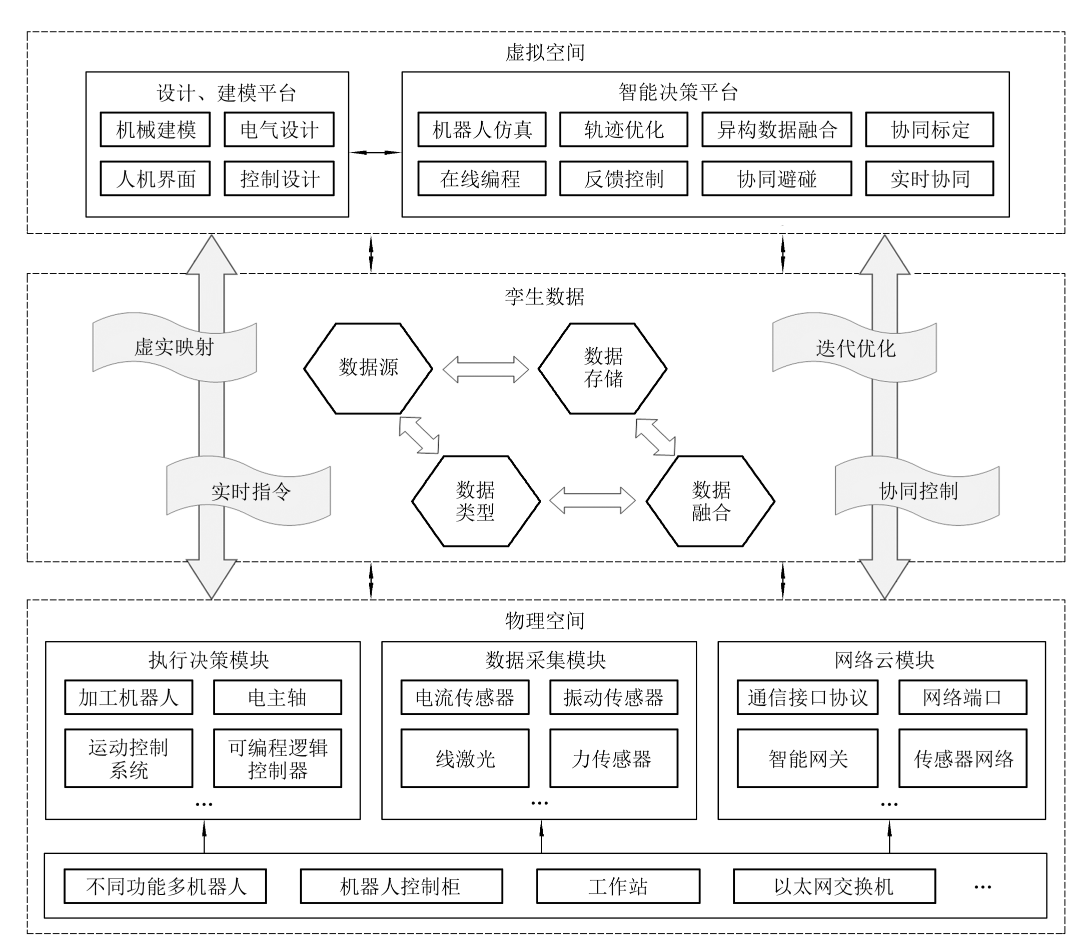


图1　多机器人智能协同加工数字孪生框架

a. 物理空间．以加工系统中的不同功能机器人及其控制柜、工作站和网络传输设备等主要组成模块形成物理空间．机器人、可编程逻辑控制器(PLC)和电主轴等设备执行加工任务的决策，通过传输协议或者多种传感器获取各设备的多源数据，实时感知设备的状态信息，采集到的实时数据必须通过网络云模块上传至云服务器．

b. 虚拟空间．设计建模平台和智能决策平台组成数字孪生框架的虚拟空间．设计建模平台根据物理空间设备的属性映射到虚拟层中构建设备孪生模型，孪生模型不仅涵盖多机器人加工系统各组件的形状尺寸等几何信息，更涉及各模块和部件的刚度、疲劳强度等材料性能及动力学、应力等物理性能分析．智能决策平台是为实现虚拟空间中的多机器人加工系统与物理存在的一致性，可通过算法库智能决策分析使模型持续优化，并可将预先设计的工艺方案输入智能决策平台中，调取工件加工程序，进行加工轨迹的干涉碰撞仿真，保证加工方案的可行性．而且，通过协同多机器人协同标定、协同避碰及反馈控制等，实现多机器人的实时协同作业．

以扫描仪采集的工件点云数据作为平台输入端，以标准成品件作为平台输出端，计算待加工件的加工余量，作为机器人加工的工艺标准以完成各

机器人加工的智能决策．机器人运动控制模块以可编程逻辑控制器与机器人控制柜为核心，通过运动决策指令控制机器人完成相应的动作指令．以孪生数据和设计建模平台输入的机器人实时加工状态为依据，确定机器人加工工件的完成情况，根据加工的完成情况下发机器人加工动作指令，实现自适应加工．

c. 孪生数据．在加工系统中存在大量的多源实时数据，孪生数据作为数字孪生框架的基础，支撑着物理空间和虚拟空间的运行，也用于系统建模、特征提取和优化决策等．数据采集、数据传输和数据存储技术对于系统的信息准确性和实时感知十分重要，具有实时感知或实时感知能力的设备能与其他制造资源进行交互协助工作，可实现多机器人协同加工过程中机器人加工状态的实时监测．

1.2 加工系统孪生数据模型

孪生数据是连接物理空间和虚拟空间的重要途经，是虚拟空间与物理空间相互映射的基础．加工中得到的数据会直接影响智能决策平台的决策输出，从而影响工件的加工质量和加工精度等，并且是反映加工系统中物理空间与虚拟空间同步性差、智能化水平低的关键因素，所以多源数据的实时性、准确性、同步性和稳定性是非常必要的．建立孪生数据模型，包括数据源、数据类型、数据融合和数据存储四个功能模块(如图2所示)，其主要目的是实现多源数据与加工元素的融合．

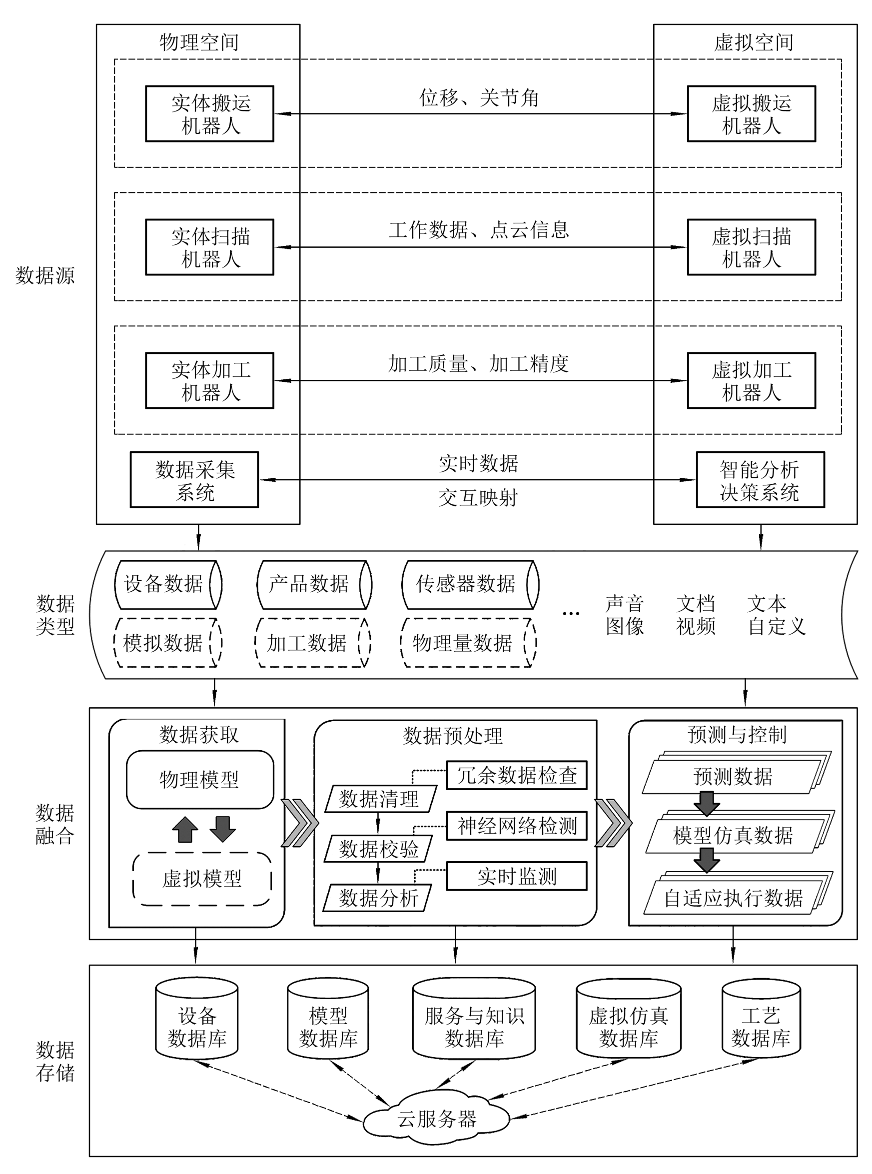


图2 多机器人智能协同加工系统孪生数据模型

a. 数据源．多机器人协同加工系统的监测设备多，各设备监测点数大，单测点采样频率高，且加工过程数据采集历时长，数据容量很大，导致其特征挖掘困难．在孪生数据模型设计中，以物理空间和虚拟空间的数据组成数据源的基础．对于物理空间，多种高精度传感器分布于系统不同设备，支

撑数字孪生系统充分获得准确、实时的数据源，通过多源传感器和数据采集系统采集动态数据，如机器人的位移、关节角、电流、振动和点云等．对于虚拟空间的相关数据，主要通过虚拟模型的建模与仿真生成，如产品结构、加工仿真数据和加工工况等，虚拟空间数据可以预测产品质量，控制系统优化加工工艺，生成最优工艺方案，质量预测和控制数据可以驱动实时加工生产．

b. 数据类型．为了提高监测的可靠性、精度和互相印证性，采用电流、负载和位移等多种不同类型传感器及监测手段进行加工系统过程监测，使得监测数据具有多源异构性，加大了数据挖掘难度，设计了由物理空间和虚拟空间的数据类型组成的数据类型层．物理空间的数据主要包括机器人及其他设备数据，类型包括机器人各轴关节角、进给速度、切削速度和主轴转速等；产品数据，如工件材料、几何形位、加工余量和加工要求等；传感器数据，如切削力、振动、位移、电流和温度场等．虚拟空间的数据主要包括模拟数据，如机器人动作位姿状态、加工工况、环境状态及工件的几何约束模型等；物理量数据，如切入角、切出角、未变形切厚等啮合关系重要过程物理量；加工数据，如加工质量、生产计划、加工进度等．

c. 数据融合．加工系统运行状态监测信息存在冗余数据，具有较大重复性，且受环境噪声干扰，其价值密度较低，给数据融合带来挑战，制约数据提纯和质量增强的效率，从而降低数据处理的时效性．在复杂多源异构协同加工系统运行数据背景下，其数据特征挖掘和诊断困难，导致加工系统运行状况监测难度较大．针对物理空间和虚拟空间所获各类型数据中存在的冗余和错误进行预处理．首先是数据清理，在获取所有的数据后，用多源冗余检查法检测数据，将冗余的数据删除，得到有效数据．然后进行数据校验，这是从数据到信息的关键步骤，以准确高精度的数据为基准，将得到的有效数据经过神经网络算法进行检测，识别并删除有误数据．接着进行数据分析，通过数据结构化消除数据中的噪声点，提高数据的准确性和一致性．对经过预处理的实时数据进行预测与仿真，输出模型仿真数据，并结合解析物理模型得到自适应执行数据，实现对物理设备和加工工艺的更新、优化和改进，更好地实时评估系统运行状态．

d. 数据存储．在数据存储阶段通过对不同对象、条件、场景获取的数据进行标准化，统一转换增强数据通用性[21]．将经过数据融合之后的“干净”数据按照格式、结构不同分别存储在对应的数据库中．将存储的数据通过网络上传至云服务器中，并进行分布式管理，在云服务器上进行加工数据读取与智能算法处理，实现加工数据特征提取与特征融合，保障存储高效可靠，并持续提供大量系统运行数据．

基于所构建的孪生数据模型，进行加工系统大数据特征提取，实现加工系统物理空间运行状态到孪生数据层的映射，进行多机器人协同加工过程不同结构的多传感器数据和系统数据的融合，并提高协同加工过程数据质量．

1.3　加工系统优化控制与决策

多机器人协同加工系统具有分布式、高冗余和可重构等优势，然而多机器人的简单叠加不仅不能提升效率，反而可能因相互干涉而影响加工系统正常运转．为此，本研究设计并探讨多机器人加工系统优化控制与决策方法．

加工系统优化控制与决策是多机器人加工系统的核心，其中多机器人协同、多任务多工序分配、定位是重难点，该模块通过规划决策与协同控制实现加工系统的稳定运行．

在多机器人加工系统中，机器人间通过通信网络进行信息交互，为保证加工系统准确规划、精确控制，多机器人协同控制至关重要．为实现机器人轨迹规划、决策和加工任务的执行，机器人实时感知环境是重要前提．

在多机器人位姿标定中，传统方法多采用各机器人分别单独标定，须要频繁移动标定仪器设备位置，多次操作执行，会使得各个机器人的位姿标定误差累积．由于舱体类构件特征众多且复杂，个体机器人在运动过程中其位置和姿态是实时变化的．在本方法中，通过一次多机器人位姿标定，确定多机器人坐标系，避免误差累积．标定全程通过视觉感知和辨识工件及其他机器人的位置与姿态，通过立体视觉测量靶标或特征，解决复杂工作环境下工件识别与工件位姿估计，实现多机器人高效高精度的定位、互定位与位姿检测．

机器人加工轨迹规划是加工精度和测量精度误差产生的重要原因，通过协同运动规划可以得出并完成相应任务机器人末端的轨迹．舱体类构件的加工通常具有狭小的加工可行空间特征，加大了加工过程避碰运动规划难度．在本研究的加工轨迹规划中，通过结构创新，在机器人末端设计了加长杆，将刀具安装于加长杆，从结构上降低了加工设备部件与工件之间避免碰撞干涉问题的难度．

舱体类构件具有典型的多型腔特征，为此在刀触点轨迹线规划中，综合考虑加工效率和加工质量，对于加工效率优先的优选行切轨迹，对于加工精度优先的优选环切轨迹．舱体类构件具有众多岛屿特征，而且通常具有不同的形状和尺寸，在轨迹规划中会导致频繁进刀和退刀．因此，将进退刀序列纳入轨迹优化模型，以降低进退刀次数，提升加工效率．对于具有曲面特征的加工表面，刀具姿态会影响切削力，进而影响让刀误差，在轨迹规划中还包括考虑切削力的刀具姿态优化模型．

在多机器人多源信息融合与在线监测中，通过基于深度学习的多源信息融合算法，采用稀疏分解对多源异构的多机器人协同加工数据进行编码，形成一致性的表征，对加工中的加工负载、刀具偏离、工件表面精度和设备状态等多个信息进行处理和融合．运用深度置信神经网络建立多机器人加工状态监测模型，判断加工过程偏差是否符合预设要求．当加工过程偏差超出预设要求，采用反馈闭环控制模型快速调整加工工艺参数，实现加工过程协同调控．

在多机器人反馈控制方法中，引入位姿误差反馈回路，通过反馈实现多机器人的闭环控制，避免机器人间干涉．由多机器人操作系统(ROS)实现多机器人实时监测、碰撞检测和协同控制，并且实时可视化显示．

基于以上算法，通过多机器人在加工中的任务分配、位置标定、干涉避免、协作加工和协同控制等，实现多机器人的高效运行优化决策与协同控制．

2 舱体类构件加工应用案例

航天飞行器舱段不仅内壁加工特征各异、可行空间狭窄，而且存在众多特征相交的问题，是典型的复杂难加工舱体类构件．某型号航天飞行器舱段通常所用加工方案的工艺准备时间长达数天，难以满足航天装备型号快速研制需求，为缩短舱段加工周期并提升智能化水平，以该型号飞行器舱段精密铣削和测量工艺为案例，应用所提出的多机器人协同方法进行加工验证，设计协同加工工艺路线，搭建协同加工平台，阐述加工系统优化决策过程，并进行可行性和高效性验证与分析．

2.1 舱段协同加工工艺路线

针对机器人离线加工中信息分散、存在偶然误差、效率低等问题，结合智能制造技术与该航天舱段加工工艺，设计了舱段多机器人智能协同加工工艺路线(如图3所示)．该技术路线主要由毛坯上料、扫描测量预加工和内壁加工等主要工艺环节构成，各环节主要工作流程如下．

a. 毛坯上料环节．将传输机构传感器信号传入工艺流程，搬运机器人收到信号后将末端工具移动至上料区，利用装夹机构的浮动气缸固定毛坯，附加第七轴导轨完成毛坯装夹，并移动至加工平台1，利用机器人可编程控制器之间通信协议将到位指令发送至扫描机器人，搬运机器人返回安全位置完成上料．

b. 毛坯扫描测量预加工．待加工转台1将毛坯固定后发送信号，扫描机器人接收信号通过快换工具夹取线激光扫描仪并与其通信，待移动模块移动至加工区域后触发线激光对加工区域进行扫描获取点云信息，并通过数据传输协议完成点云数据的传输工作，扫描完成后通过快换工具夹持加工工具对毛坯上较为突出的缺陷进行预加工．

c. 毛坯内壁加工．预加工后搬运机器人夹取毛坯至加工转台2进行毛坯定位，在云服务层中将传输的点云数据与最终成品件的三维数据进行对比，得到毛坯件的加工余量与加工区域，结合点云生成机器人加工轨迹，通过神经网络结构算法形成机器人的加工程序，并下发至物理空间的加工机器人完成毛坯加工．待加工完成后通过搬运机器人转运至扫描测量平台，利用线激光进行加工检测，若加工质量符合要求则搬运机器人完成下料动作，若不符合要求则须计算工件的加工余量再进行加工补偿，直至加工质量满足要求．

上述工艺环节之间通过协同数据中心进行状态信息互联．对于协同加工系统物理空间中采集的多传感器异构数据，由在线监测模块进行数据融合和特征提取，并由协同控制模块进行多机器人实时协同和工艺优化，调控加工系统工作效率和加工精度．

2.2 智能协同加工平台

考虑到航天舱段毛坯质量、机器人加工实时数据传输需求、机器人可拓展性及操作性，采用多机器人作为整套工艺流程的主要运动实现和操作设备．加工平台分为机器人子系统、监测子系统和数据存储与过程控制子系统．其中，机器人子系统包括三台工业机器人、机器人平移辅助装置、辅助转动轴装置、工件用户坐标系标定装置及对刀仪等；监测子系统主要包括线激光扫描仪、电主轴状态检测仪、电流传感器、振动传感器、力-位移传感器

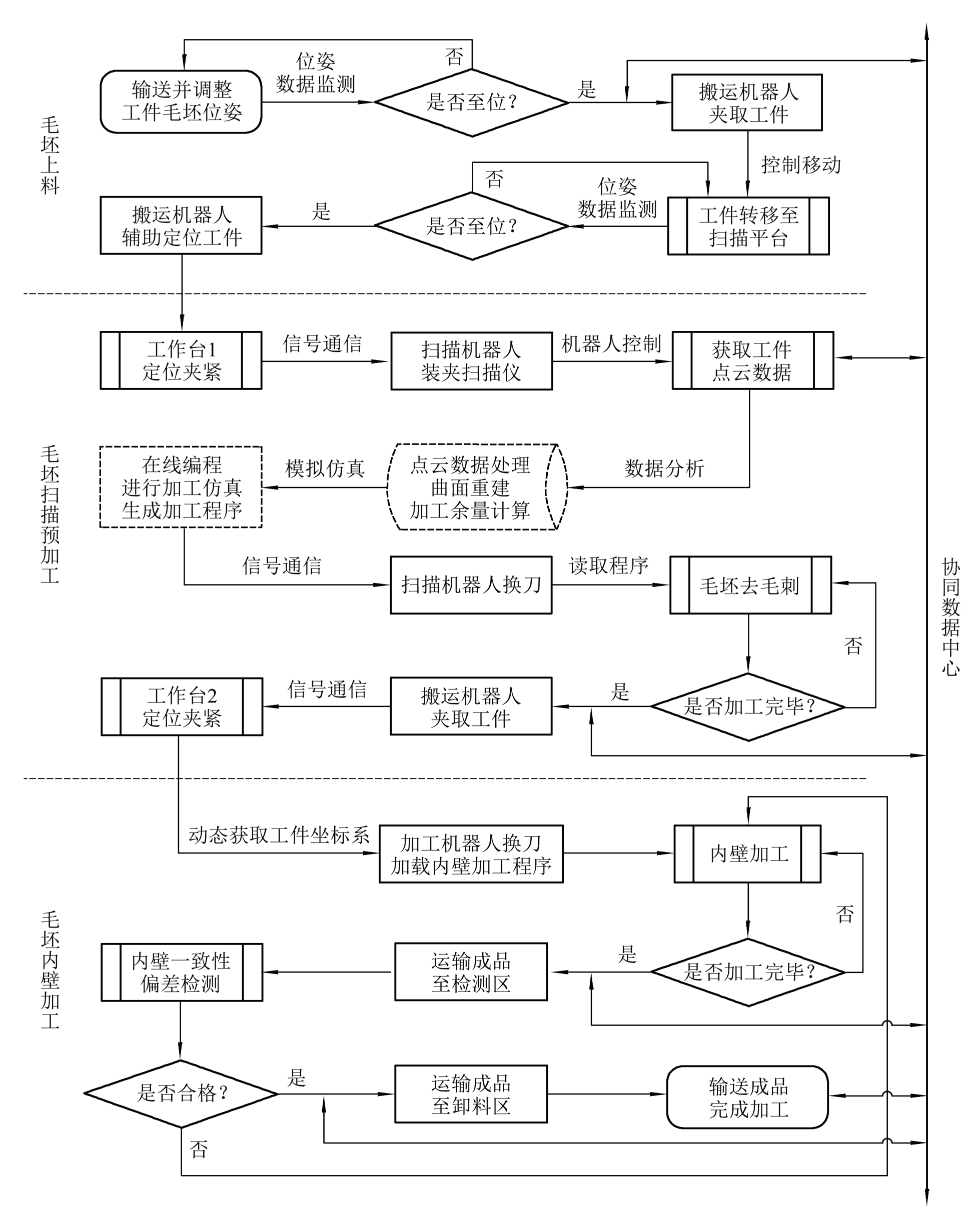


图3　航天舱段多机器人协同加工工艺路线

和数据采集模块等；数据存储与过程控制子系统主要包括可编程逻辑控制器控制柜、云服务器和总控中心等．

针对加工件质量要求测量待加工区域，获得其信息数据并与成品件模型相匹配，得到待加工件加工余量；在加工机器人上布置电流和振动传感器采集加工数据，完成刀具状态监测；利用搬运机器人将舱段转运至扫描测量机器人进行质量检测．在总控中心，上位机通过传输协议进行数据提取，将提取的数据进行分析处理，输出到智能决策模块生成机器人加工的控制指令程序，通过可编程逻辑控制器控制机器人加工工艺自动化动态调整．

2.3　加工系统验证与分析

应用所提出的方法，本研究开发了基于数字孪生的多机器人协同加工软件系统，软件系统的模块和功能如下．

a. 通信链接．提供机器人操作系统参数服务器、相机通信功能．通过机器人操作系统通信机制建立数据流，接收预处理点云数据并生成机器人触点轨迹，进行机器人逆运动学求解等．相机通信功能可实现工件点云信息采集及实时显示，以便调整机器人位姿．

b. 设备中心．提供多种机器人模型、工具模型库和案例的导入功能，使数字孪生虚拟空间适应环境复杂、工况多变的不同加工场景．

c. 点云处理．基于预定参考模型进行点云滤波、平滑参数输入、点云-模型方差最小化匹配等处理，可查看单步处理结果，调整轨迹生成策略，生成加工轨迹，创建孪生模型并进行机器人加工仿真、验证．

d. 工艺参数优化．关联数字孪生加工系统参数配置，输入加工工艺参数，通过改变参数的输入可实现机器人加工工艺轨迹的在线规划，查看运动轨迹结果，验证加工轨迹的可行性与可靠性，实现机器人仿真与主控功能．

数字孪生加工系统物理模型和虚拟模型的关联、交互驱动了软件系统的同步运行，实现了数字孪生系统的生产过程优化改进，同时可对物理空间加工过程进行实时、可视化监控．设备工作状态透明，运行轨迹可监测，异常数据可处理、警示，保证加工系统的稳定、准确、合理运行．

本研究以上述案例中航天舱段为对象，分别用多机床组成的生产线加工方法(A)、多机器人离线加工方法(B)及本研究提出的基于数字孪生的多机器人智能协同加工方法(C)进行加工，并对三种方法的加工效果进行比较，如表1所示．

表1　三种方法加工舱段的多指标比较

指标	方法A	方法B	方法C
生产周期/d	>10	>4	<2
工件定位精度/mm	0.15	0.10	0.10
全尺寸测量精度/mm	±0.2	±0.2	±0.1
内腔加工型面精度/mm	⩽0.2	±0.5	±0.2
壁厚一致性偏差/mm	⩽0.2	>0.5	⩽0.2
成本/万元	1 000~3 000	200~500	200~500

A方法工序较分散，须多次人工安装、拆卸和定位，辅助加工时间长，且须对多台机床进行调试与工艺规划等操作，生产周期为10 d以上．B和C方法通过集中工序，两次定位完成几乎所有工序，大大缩短工艺准备时间．B方法通过人工多次调试程序，离线进行多机器人协作设计、工序规划和工艺优化，须人工重复迭代和过程监视，工序准备时间虽有缩短，但仍不理想．C方法(本文方法)中多机器人协作、工件装卸及定位、工序规划等几乎所有操作均由智能加工系统完成，并能在线监测和实时优化调控，工艺准备时间缩短到2 d以内．以该航天舱段中的一个约200 cm²的型腔为例，采用三种方案加工型腔所用加工时间如图4所示(t_1和t_2分别为方法B和方法A与方法C的加工时间差值)．

可见采用本文方法在该舱段工件定位和加工过程所用的时间有明显缩短，本文方法的加工效率相对于A和B两种方法提高了约46%和17%，这主要是因为A和B方法的工件定位和加工过程对人工干预的依赖．

A方法的多次安装还使得工件定位精度难以保证，而B和C两种方法通过工序集中保证了较好的工件定位精度一致性．本文方法的测量精度、加工精度更高，对舱段的壁厚一致性偏差不大于0.2 mm，且工艺准备时间远小于其他两种方法．本文方法精度的提升还得益于通过优化控制与决策，降低了加工过程各环节中误差及其累积效应，例如在多机器人位姿标定中，本文方法是通过一次标定确定多机器人位姿，避免了误差累积．

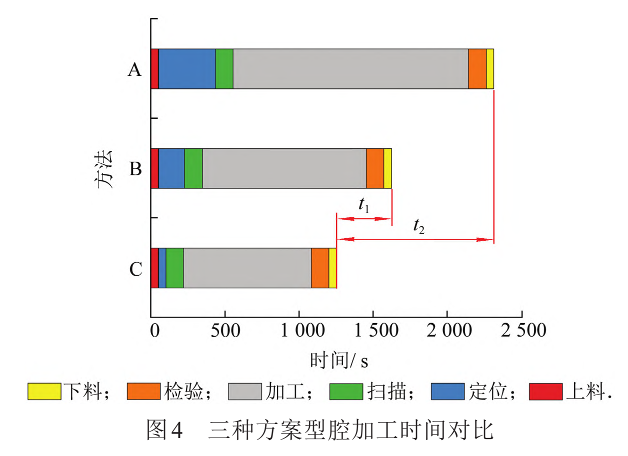


图4　三种方案型腔加工时间对比

除了上述关于加工效率和精度的分析，还比较了三种方法的成本、柔性和智能化指标(如表1所示)．A方法需要多台不同类型的加工机床，并配备多名匹配相应机床设备的工艺人员，使其设备成本、场地成本和人工成本都很高．而且A方法柔性和智能化水平较低，多用于小品种大批量零件制造，难以适应加工对象型号和规格频繁改变的任务．

本文方法可以通过智能协同加工系统实现在线编程，实时更新加工工艺，适应加工对象改变，具有较好的柔性和智能化水平，可较好地胜任以舱段为代表的多品种小批量航天类零件制造．通过效率、精度、柔性和智能化等多指标对比，验证了基于数字孪生的多机器人智能协同加工方法在舱段加工中的可行性和高效性．

3　结语

以航天装备快速和高质量发展需求为背景，针对航天舱体类构件高效高精加工问题，提出基于数字孪生的多机器人智能协同加工方法，构建了多机器人智能协同加工系统架构，该架构通过多机器人协同加工过程中的孪生数据，实现物理空间和虚拟空间之间的映射和交互，建立孪生数据模型并探讨了其交互策略，设计了协同加工系统优化控制决策方案，优化了工艺路线和加工轨迹．

本研究搭建了多机器人智能协同加工平台，开发了基于数字孪生的协同加工系统软件，通过物理空间和虚拟空间的关联、映射和交互，实现对物理空间加工过程的实时可视化监测与工艺优化控制；将加工系统应用于某型号航天飞行器舱段精密铣削和测量工艺，验证了该方法的可行性．

通过与多机床生产线、多机器人离线加工方法进行对比，从效率、精度、成本和柔性等指标方面进行分析，展现了本文方案的有效性；并与已有多机器人离线加工方法从全尺寸测量精度、内腔加工型面精度、壁厚一致性偏差和工艺准备时间等方面进行量化比较，表明本文方法可实现更高效率和精度．

本研究可为各类复杂构件智能化加工提供方法支撑，并可望推动数字孪生在智能制造领域的深入应用．未来可根据设备加工需求，拓展应用于其他多特征类构件或复杂曲面零件，也可在工艺系统中集成激光熔覆和表面处理等更多功能机器人，进一步实现工序集中，提高生产效率和智能化水平．

参 考 文 献

[1] 陆凯，李迎光，刘旭，等．数据驱动的飞机结构件加工特征识别方法[J]．航空制造技术，2021，64(8)：32-40．

[2] 赵文政，刘银华，金隼．面向多机器人协调运动规划的层级化任务分配方法[J]．计算机集成制造系统，2021，27(4)：999-1007．

[3] FISCHER H，VULLIEZ M，LAGUILLAUMIE P，et al．RTRobMultiAxisControl：a framework for real-time multiaxis and multirobot control[J]．IEEE Transactions on Automation Science and Engineering，2019，16(3)：1205-1217．

[4] BI Q，WANG X，WU Q，et al．Fv-SVM-based wall-thickness error decomposition for adaptive machining of large skin parts[J]．IEEE Transactions on Industrial Informatics，2018，15(4)：2426-2434．

[5] 廖文和，郑侃，孙连军，等．大型复杂构件机器人加工稳定性研究进展[J]．航空学报，2022，43(1)：156-175．

[6] TAO F，CHENG J，QI Q，et al．Digital twin-driven product design manufacturing and service with big data [J]．International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2018，94(9/10/11/12)：3563-3576．

[7] 李晓理，王康，于秀明，等．基于CPS框架的微粉生产过程多模型自适应控制[J]．自动化学报，2019，45(7)：1354-1365．

[8] ZHU K，ZHANG Y．A cyber-physical production system framework of smart CNC machining monitoring system[J]．IEEE/ASME Transactions on Mechatronics，2018，23(6)：2579-2586．

[9] 李浩，王昊琪，程颖，等．数据驱动的复杂产品智能服务技术与应用[J]．中国机械工程，2020，31(7)：757-772．

[10] PANG J，ZHANG N，XIAO Q，et al．A new intelligent and data-driven product quality control system of industrial valve manufacturing process in CPS[J]．Computer Communications，2021，175：25-34．

[11] ZHU K，LI G，ZHANG Y．Big data oriented smart tool condition monitoring system[J]．IEEE Transactions on Industrial Informatics，2019，16(6)：4007-4016．

[12] 王书亭，景伟，蒋立泉，等．基于多机自律协同的柔性作业移动机器人调度[J]．华中科技大学学报(自然科学版)，2020，48(12)：1-7．

[13] 陶飞，刘蔚然，张萌，等．数字孪生五维模型及十大领域应用[J]．计算机集成制造系统，2019，25(1)：1-18．

[14] 陶飞，马昕，戚庆林，等．数字孪生连接交互理论与关键技术[J]．计算机集成制造系统，2023，29(1)：1-10．

[15] 陶飞，刘蔚然，刘检华，等．数字孪生及其应用探索[J]．计算机集成制造系统，2018，24(1)：4-21．

[16] TAO F，ZHANG M．Digital twin shop-floor：a new shop-floor paradigm towards smart manufacturing[J]．IEEE Access，2017，5：20418-20427．

[17] STARY C．Digital twin generation：re-conceptualizing agent systems for behavior-centered cyber-physical system development[J]．Sensors，2021，21(4)：1096．

[18] ZHOU G，ZHANG C，LI Z，et al．Knowledge-driven digital twin manufacturing cell towards intelligent manufacturing[J]．International Journal of Production Research，2020，58(4)：1034-1051．

[19] LIU J，ZHAO P，JING X，et al．Dynamic design method of digital twin process model driven by knowledge-evolution machining features[J]．International Journal of Production Research，2022，60(7)：2312-2330．

[20] 隋少春，许艾明，黎小华，等．面向航空智能制造的DT与AI融合应用[J]．航空学报，2020，41(7)：624173．

[21] ZHANG M，TAO F，HUANG B，et al．Digital twin data：methods and key technologies[J]．Digital Twin，2022，1(2)：1-29．